

塔里木河下游不同退化阶段胡杨径向生长量变化特征

皮原月¹, 叶茂², 徐长春¹

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

摘要:以塔里木河下游胡杨为研究对象,借助树木年轮水文学的方法,运用 LINTAB™6 型树木年轮测定仪读取钻心的年轮宽度,研究了塔里木河下游不同退化阶段离河道不同距离胡杨径向生长量的年际变化特征及其差异分析。结果表明:(1) 2000 年生态输水后,胡杨平均径向生长量有显著的变化,胡杨生长进入了生长高峰期;(2) 应急生态输水促使胡杨突变性地增长,如果生态输水没有达到一定的量或持续时间,胡杨径向生长量在短时间内就会表现为不再增长或下降,若要保持胡杨长势良好,要继续加强输水;(3) 塔里木河下游不同退化阶段胡杨径向生长量差异极显著($p < 0.001$),不同退化阶段胡杨多年平均径向生长量大小排序依次是中度退化区>极度退化区>重度退化区;不同退化阶段胡杨对输水的响应均具有滞后性且响应程度不同,输水后处于不同退化阶段胡杨平均径向生长量出现极值的年份存在较大差异;(4) 塔里木河下游不同退化阶段离河道不同距离胡杨平均径向生长量差异极显著($p < 0.001$),整体上随着离河道距离的增加,胡杨径向生长量呈现下降趋势。

关键词:塔里木河下游; 胡杨径向生长量; 生态输水

中图分类号:Q945

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0313-05

Analysis on the Radial Growth Characteristics of *Populus euphratica* at Different Degradation Stages in the Lower Reaches of Tarim River

PI Yuanyue¹, YE Mao², XU Changchun¹

(1. College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: We analyzed the radial growth quantity variation of *Populus euphratica* at different degradation stages in the lower reaches of Tarim River through the method of tree rings of hydrology, employing the LINTAB™6-type tree ring tester to read the width of tree rings. The results are as follows: (1) the average radial growth quantity was influenced evidently and reached a growth peak period after ecological irrigation; (2) ecological irrigation emergently promoted the growth of *Populus euphratica* mutationally; if the amount of ecological irrigation had not been reached a certain quantity, radial growth of *Populus euphratica* will show as no longer growth or decline in a short period of time; if the *Populus euphratica* is kept grow well, delivery water should be continued; (3) radial growth quantity of *Populus euphratica* at different degradation stages was very significant ($p < 0.01$) in the lower reaches of Tarim River. The sequence of average radial growth quantity of *Populus euphratica* at different degradation stages over years was moderately degraded area > extremely degraded area > seriously degraded area; *Populus euphratica* of different degradation stages responded to water irrigation differently and had the hysteresis; Average radial growth quantity of *Populus euphratica* at different degradation stages had a bigger difference in terms of the year of average radial growth of extremum after ecological irrigation; (4) the differences of average radial growth quantity of *Populus euphratica* in the different distances from the water channel at different degradation stages were very significant ($p < 0.001$) in lower reaches of Tarim River. On the whole, as the distance from the water channel increased, the radial growth quantity of *Populus euphratica* showed a downward trend.

Keywords: lower reaches of Tarim River; radial growth quantity of *Populus euphratica*; ecological irrigation

塔里木河流域地处亚欧大陆腹地,是我国典型的干旱荒漠区^[1-2]。塔里木河是我国最长的内陆河,自西向东绕塔克拉玛干沙漠北缘贯穿塔里木盆地,由于人口的不断增加,源流及上中游大规模的水土开发和资源的不合理利用,导致干流下游的尾间湖—台特玛湖在 70 年代初逐渐萎缩至干涸,造成该流域生态水文过程丧失,天然植被大面积衰减,土地沙漠化不断加剧,使绿色走廊的生态环境岌岌可危^[3-4]。2000 年开始连续向塔里木河实施以生态恢复和环境保护以及拯救“绿色走廊”为目标的生态输水工程。输水后塔里木河下游生态得到明显的良性改善,为准确评估输水的生态效益,许多专家和学者从不同角度对生态输水后的生态效应进行了研究分析^[5-11]。而不同退化区受气候因素^[12-13]影响的天然植被胡杨对生态输水是否有响应? 响应程度及响应时间是否存在差异? 生态环境退化越严重区域胡杨年均径向生长量是否越少,这些问题有待进一步深入研究,对塔里木河下游胡杨恢复具有重要指导意义。

本文以塔里木河下游天然胡杨林为研究对象,基于树木年轮学的基本方法,研究塔里木河下游处于不同退化阶段胡杨主干径向生长量年际变化特征及年际变化速率,并对处于不同退化阶段胡杨径向生长量时空变化特征进行对比分析,初步探讨输水前后处于不同退化阶段各个断面胡杨径向生长量的差异,为输水后塔里木河下游植被恢复的量化和塔河下游天然胡杨林的恢复与保育提供理论依据。

1 研究区概况

塔里木河流域是中国第一大内陆河流域,地处亚欧大陆腹地,是新疆乃至中国生态环境最为脆弱的地方之一,该区域属暖温带大陆性荒漠干旱气候,干燥且多沙尘天气,年均降水量 17~34 mm,年蒸发量高达 2 408~2 671 mm,平均日较差 13~17℃,是我国极端干旱地区之一。塔里木河下游的主要建群植物为胡杨 (*Populus euphratica*) 和怪柳 (*Tamarix chinensis*),1972 年,大西海子水库建成以后,塔里木河下游河道断流,地下水位下降,胡杨林的面积由 20 世纪 50 年代的 5.4 万 hm^2 减少到 70 年代的 1.64 万 hm^2 ,90 年代减少到 0.67 万 hm^2 ,下游地区裸地逐渐增多,沙漠化严重,生态系统严重受损。

2 研究方法

参照相关研究^[14-16],选取塔里木河下游 3 个典型断面:生态系统中度退化的英苏断面(C)、生态系统重度退化的阿拉干断面(G)、生态系统极度退化的依

干不及麻断面(H)。距离台特玛湖的距离: $C>G>H$ 。为使样本具有代表性,在每个地区沿河道垂直方向上,每个固定地下水监测井周围选取长势较好的胡杨进行取样,取样位置及样本数见表 1。

表 1 取样位置及样本数

英苏(C)		阿拉干(G)		依干不及麻(H)	
离河道 距离/m	样树/ 株	离河道 距离/m	样树/ 株	离河道 距离/m	样树/ 株
50	5	50	4	50	4
150~400	8	150~400	8	150~400	7
500~750	7	500~750	6	500~750	6
1050	5	1050	4	1050	4
合计	25		22		21

野外取样时,用刀片将胡杨的外皮层去除,再用生长锥在主干上“十字交叉”采集两个垂直方向的钻芯,接着使用芯勺提取钻芯,后将其装入吸管内,带回实验室进行处理。在实验室内,对其进行打磨、抛光、样品编号等预处理,采用交叉定年法进行定年^[15]。采用 LINTABTM6 型树木年轮测定仪(分辨率 0.001 mm,德国)读取钻芯的两个垂直方向上的年轮宽度。同一年两个垂直方向年轮宽度平均值作为当年树木年轮宽度;取同一断面至少 3 株胡杨径向生长量的平均值作为该断面胡杨年轮的宽度值;研究不同断面之间以及离河道不同距离处胡杨径向生长量的年际变化特征,分析生态输水对塔里木河下游胡杨的影响,为塔里木河下游大规模生态恢复工程和生态输水效益提供基础的理论依据。

3 结果与分析

3.1 塔里木河下游不同退化阶段胡杨平均径向生长量年际变化特征

3.1.1 塔里木河下游中度退化区英苏断面胡杨平均径向生长量变化特征 对英苏断面不同距离相同年份所有胡杨的生长量进行平均,得到该断面胡杨年平均径向生长量值,进而计算出英苏断面胡杨年平均径向生长速率(图 1)。从胡杨径向生长量变化曲线看,胡杨平均径向生长量的年际变化波动较大,呈现先减少后增加趋势。1976—1979 年、1985—1988 年、2002—2005 年胡杨平均径向生长量呈现逐年下降趋势;1979—1985 年、1994—2002 年胡杨平均径向生长量呈现逐年增加趋势。从年际变化上看,生态输水对 C 断面胡杨径向生长影响非常显著,2000 年生态输水以后,由于胡杨径向生长存在滞后效应。胡杨径向生长在 2002 年达到输水后的最大值 4.887 mm,高出 C 断面胡杨径向生长平均值 2.675 mm。2005 年胡杨径向生长量突然减小,可能与 2004 年输水量突然减少有关。

从胡杨径向生长速率变化曲线看,胡杨径向生长速率呈现增加和减少交替变化趋势。2000 年生态输水以前,胡杨平均径向生长速率 0.013 mm/a ,胡杨径向生长整体上呈现增加趋势,这可能是由于英苏断面处于塔里木河上游,受水分胁迫影响较小。在生态

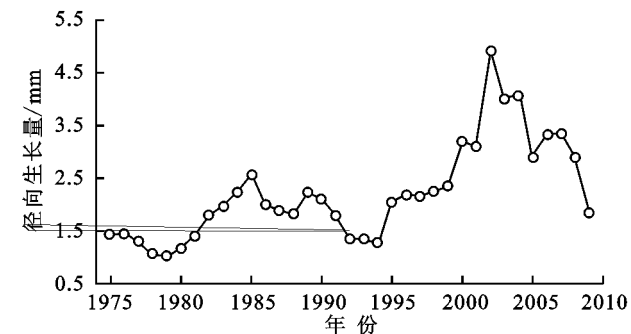


图 1 1975—2009 年塔里木河下游中度退化 C 断面胡杨径向生长量和径向生长速率变化

3.1.2 塔里木河下游重度退化区阿拉干断面胡杨平均径向生长量变化特征 从阿拉干断面胡杨径向生长量变化曲线看(图 2),胡杨平均径向生长量的年际变化为先减少后增加再减小。1976—1997 年胡杨平均径向生长量呈现逐年缓慢减小趋势,1997—2006 年胡杨平均径向生长量逐年增加,2006—2009 年胡杨平均径向生长量又呈现逐年下降趋势。从 G 断面的年际变化曲线上,得知生态输水对胡杨生长产生的影响,2000—2002 年,胡杨平均径向生长量增幅不明显,主要受到输水滞后效应的影响,之后增加迅速,到 2005 年胡杨平均径向生长量出现最大值,值为 1.769 mm ,高出 G 断面胡杨多年平均径向生长量 0.546 mm 。

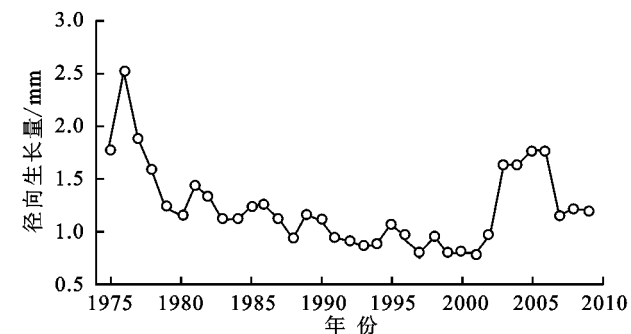
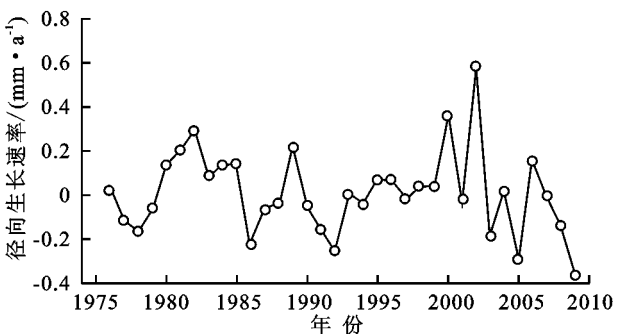


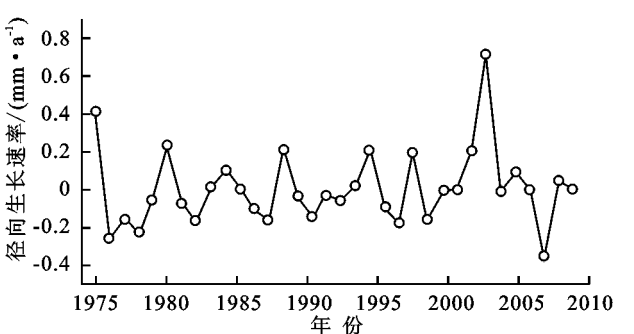
图 2 1975—2009 年塔里木河下游重度退化 G 断面胡杨径向生长量和径向生长速率年际变化

3.1.3 塔里木河下游极度退化区依干不及麻断面胡杨平均径向生长量变化特征 从胡杨径向生长量变化曲线看,胡杨平均径向生长量处于波动状态,总体上呈先下降后增加再下降趋势。1976—1978 年、1989—1992 年、2005—2009 年胡杨平均径向生长量逐年减小;1978—1980 年、1999—2005 年胡杨平均径向生长量逐年增加。2000 年生态输水以后,H 断面增幅较大,总体上呈先上升后下降的趋势,到 2004 年达到输水后的最大值 3.134 mm ,自 2004 年开始,由

输水当年,胡杨对生态输水就有了明显的响应,生长速率迅速增加达到 0.362 mm/a ,而在 2001 年以后,该断面胡杨生长速率整体上呈现减少趋势,这可能与输水量、输水时间以及胡杨在长期干旱后对水分变化响应的灵敏度有关。



从胡杨径向生长年际变化速率看,在 2000 年生态输水以前,胡杨年轮径向生长速率处于增加和减少的交替变化阶段,年轮生长很不稳定,速度在 -0.02 mm/a 上下波动,说明胡杨径向生长量整体上呈现减少趋势。在 2000 年生态输水以后,胡杨生长量大幅度增加,速度在 0.07 mm/a 左右徘徊,在 2003 年达到最大值,说明胡杨对生态输水的响应很显著且具有滞后性,在一定程度上表明 2004 年后胡杨生长量增加幅度减小。以上分析我们可以看出,胡杨年轮径向生长虽然没有明显的规律,但在 2000 年前后的变化速度有显著不同。2000 年生态输水以后,胡杨年轮生长速度明显高于生态输水前。



于该年的输水量比 2003 年减少了 83.7% ,造成胡杨径向生长量逐渐变小;2005 年胡杨径向生长量持续降低,因胡杨生长受到 2004 年输水量突然减少的影响。从胡杨径向生长速率变化曲线看,胡杨径向生长速率处于增加和减少交替变化的波动状态,生态输水前,胡杨平均径向生长速率为 -0.014 mm/a ,胡杨生长整体上呈现衰败趋势。生态输水后,由于胡杨对生态输水响应的滞后效应,胡杨径向生长速率在 2004 年达到最大值 1.05 mm/a ,而 2004 年以后胡杨生长

速率又呈现减少趋势,说明极度退化区依干不及麻断面胡杨对生态输水有响应,但这种人为作用下的生态

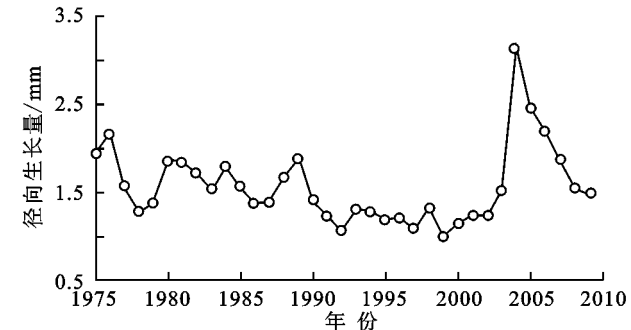


图 3 1975—2009 年塔里木河下游极度退化 H 断面胡杨径向生长量和径向生长速率年际变化

3.2 塔里木河下游不同退化阶段胡杨径向生长量对比分析

由图 4 可以看出,生态输水前(2000 年以前),由于塔里木河断流、水资源供应不足,英苏、阿拉干、依干不及麻各断面胡杨径向生长量均没有显著增加趋势,各断面胡杨处于低生长、平缓波动状态。在 1975—1981 年,3 个断面生长量大小依次是:阿拉干、依干不及麻、英苏;1979—1999 年,三个断面生长量次序发生了相反的变化,英苏断面胡杨径向生长量跃居第一,依干不及麻断面第二,阿拉干断面第三。1994 年以后,英苏断面胡杨径向生长量迅速增大,而阿拉干、依干不及麻断面胡杨径向生长量没有明显增减变化。中度退化区英苏断面距离大西海子水库较近,土壤含水率较高,胡杨长势优于重度退化区阿拉干断面、极度退化区依干不及麻断面。但极度退化区依干不及麻断面胡杨长势整体上优于重度退化区阿拉干断面,其原因有待进一步考究。

生态输水后(2000 年以后),塔里木河中段下游天然植被的盖度、多样性指数、胡杨冠幅等生态指标在整体上均有一个明显的梯度变化^[11-12]。随着生态输水的实施,处于不同退化阶段各个断面胡杨径向生长量均出现明显的响应,但响应时间不同,英苏断面胡杨径向生长量在 2002 年达到最大值 4.887 mm,依干不及麻断面胡杨径向生长量在 2004 年达到最大值 3.134 mm,阿拉干断面胡杨径向生长量在 2005 年达到最大值 1.769 mm,各个断面胡杨径向生长量达到最大值后均呈现不同幅度的下降趋势,说明人为作用下的生态输水促使胡杨突变性地增长,如果生态输水没有达到一定的量或持续时间,胡杨径向生长量在短时间内就会表现为不再增长或下降。

采用单因素方差分析法,对不同退化阶段胡杨径向生长量的差异显著性进行检验($p<0.001$)。方差分析表明(表 2),不同退化阶段胡杨径向生长量差异极显著。各断面胡杨径向生长量差异极显著,这可能

输水只能促进胡杨暂时性突变增长,不能从根本上扭转胡杨逐步走向衰败的趋势。

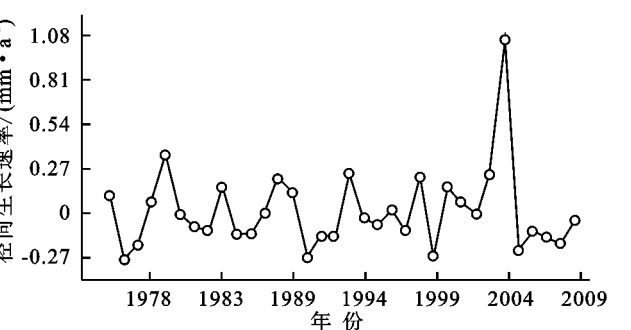


图 4 塔里木河下游处于不同退化阶段胡杨年轮生长总体趋势

表 2 方差分析

参数	平方和	自由度	均方	F	Sig.
组间	22.822	2	7.607	20.668	0.000
组内	51.161	139	0.368		
总和	73.984	142			

表 3,不同退化阶段胡杨平均径向生长量出现极值的年份也存在较大差异,胡杨平均径向生长量最高值出现在 C 断面,最低值出现在 G 断面。C、G 断面出现最大值的年份不同,其最大值分别为 4.887、2.501 mm。C、G、H 断面出现平均径向生长量的最小值的年份各不同,其最小值分别为 0.784、0.665、1.014 mm(表 3)。

塔里木河下游不同退化阶段胡杨多年平均径向生长量存在明显差异,3 个不同退化阶段胡杨多年平均径向生长量排序依次为 $G<H<C$,C 断面为最大值,G 断面为最小值。处于极度退化区依干不及麻断面多年平均径向生长量极大值和极小值均大于处于重度退化区阿拉干断面,其原因需要进一步探讨。

表 3 不同退化阶段胡杨径向生长量变化

断面	最小值/mm	年份	最大值/mm	年份	多年均值
阿拉干(G)	0.784	1997	2.501	1976	1.223
依干不及麻(H)	0.998	1999	3.134	2004	1.568
英苏(C)	1.014	1979	4.887	2002	2.212

3.3 塔里木河下游不同退化阶段离河道不同距离胡杨径向生长量的年际变化特征

图 5 显示不同退化阶段离河道不同距离胡杨径向生长出现不同幅度的生长高峰期。1975—1991 年,不同退化阶段离河道不同距离胡杨径向生长出现较小的生长高峰期,这可能与当时的大气降水、地下水位等因素有关;1991—2000 年,不同退化阶段离河道不同距离胡杨径向生长均处于低谷时期,这可能与当时的沙漠化加剧、水资源的不合理利用等因素有关;2000—2009 年,不同退化阶段离河道不同距离胡杨径向生长均出现较大的生长高峰,主要是受 2000 年以后连续向塔里木河进行应急生态输水的影响。其中,2000—2001 年相对于输水前变化幅度不大,到 2002 年出现上升趋势,直到 2003 年、2004 年出现生长高峰,之后呈现下降趋势,但下降幅度不大,表明生态输水对塔里木河下游胡杨生长影响显著。

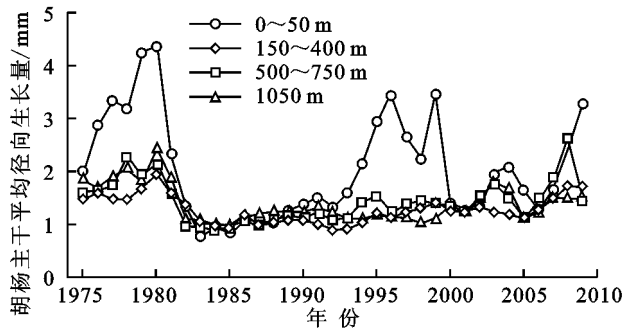


图 5 塔里木河下游不同退化阶段离河道不同距离胡杨平均径向生长量年际变化

不同退化阶段离河道不同距离胡杨平均径向生长量差异极显著($p<0.001$),整体上随着离河道距离的增加,胡杨径向生长呈现下降趋势(表 4,图 5)。经比较,离河道 150 m 处、300 m 处、400 m 处差异性不显著,将其归为一类(150~400 m);离河道 500 m 处、750 m 处差异性也不显著,将其归为一类(500~750 m);离河道 50 m 处、1 050 m 处胡杨各为一类。离河道不同距离的胡杨径向生长量差异性显著,主要是因为随着离河道距离的增加,地下水位上升幅度越小,胡杨径向生长量逐渐降低。生态输水的效应逐渐减弱,胡杨年轮所反映的胡杨对生态输水的响应信息也逐渐减少。

表 4 离河道不同距离胡杨径向生长量方差分析

参数	平方和	自由度	均方	F	Sig.
组间	19.423	6	3.237	11.013	0.0001
组内	69.955	238	0.294		
总和	89.378	244			

4 讨论

本文在前人研究基础上,分析了塔里木河下游不

同退化阶段胡杨径向生长的变化特征。在时间上,塔里木河下游处于不同退化阶段胡杨径向生长量在输水前后(2000 年前后)均有明显变化。在 1979—2000 年,各断面胡杨径向生长量均表现出较低的值,为 1.45 mm;在 2000—2009 年各断面胡杨径向生长量有不同幅度增加,平均值为 2.14 mm,平均增加了 48%。在空间上,各个断面胡杨径向生长量存在明显差异,表现在不同断面胡杨径向生长量差异明显,离河道不同距离胡杨径向生长量差异明显,这与前人的研究结果一致^[17-18]。

塔里木河下游不同退化阶段胡杨径向生长量差异极显著,不同退化阶段胡杨多年平均径向生长量大小排序依次是中度退化区>极度退化区>重度退化区;中度退化区英苏断面距离大西海子水库较近,土壤含水率较高,胡杨长势优于重度退化区阿拉干断面、极度退化区依干不及麻断面。但极度退化区依干不及麻断面胡杨长势整体上优于重度退化区阿拉干断面,其原因有待进一步深入探讨和研究。

5 结论

- (1) 2000 年开始连续向塔里木河进行的生态输水工程,对塔里木河下游处于不同退化阶段胡杨平均径向生长量有显著的影响,胡杨生长进入了一个生长高峰期。
- (2) 人为作用下的生态输水促使胡杨突变性地增长,如果生态输水没有达到一定的量或持续时间,胡杨径向生长量在短时间内就会表现为不再增长或下降,若要保持胡杨长势良好,需要继续加强输水。
- (3) 塔里木河下游不同退化阶段胡杨径向生长量的年际变化差异明显,不同退化阶段胡杨径向生长量差异极显著($p<0.001$),不同退化地区胡杨多年平均径向生长量大小排序依次是中度退化区>极度退化区>重度退化区。
- (4) 不同退化地区胡杨对输水响应均具有滞后性且响应程度不同,输水后不同退化阶段胡杨平均径向生长量出现极值的年份存在较大差异,其具体原因需进一步探讨。
- (5) 塔里木河下游不同退化阶段离河道不同距离胡杨平均径向生长量差异极显著($p<0.001$),整体上随着离河道距离的增加,地下水位上升幅度下降,胡杨径向生长量呈现下降趋势,离河道不同距离处胡杨对 2000 年以后连续向塔里木河进行的应急生态输水均有响应,但程度不同,距离河道越近,响应程度越大。

- bon fractions and nutrients as affected by land use in semi-arid region of Loess Plateau of China[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(2):146-152.
- [16] Fang X, Xue Z, Li B, et al. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2012, 88(1):6-13.
- [17] Chen L, Gong J, Fu B, et al. Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the loess hilly area, loess plateau of China[J]. *Ecological Research*, 2007, 22(4):641-648.
- [18] Zhu H, Wu J, Guo S, et al. Land use and topographic position control soil organic C and N accumulation in eroded hilly watershed of the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2014, 120:64-72.
- [19] 王俊明, 张兴昌. 退耕草地演替过程中的碳储量变化[J]. *草业学报*, 2009, 18(1):1-8.
- [20] Groffman P M, Driscoll C T, Fahey T J, et al. Effects of mild winter freezing on soil nitrogen and carbon dynamics in a northern hardwood forest[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 56(2):191-213.
- [21] Morrison I K, Foster N W. Fifteen-year change in forest floor organic and element content and cycling at the Turkey Lakes Watershed[J]. *Ecosystems*, 2001, 4(6):545-554.
- [22] 刘伟, 程积民, 高阳, 等. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2012, 49(1):68-76.
- [23] 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征[J]. *草业学报*, 2014, 23(2):9-19.
- [24] 朱继鹏. 晋西黄土区水源涵养林优化配置研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [25] 武思宏. 晋西黄土区嵌套流域生态水文过程模拟研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [26] 张瑞. GIS支持下的晋西黄土区水土保持林生态效益评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [27] 张志, 朱金兆, 朱清科, 等. 蔡家川流域景观自然度研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(5):128-131.
- [28] 李慧敏. 晋西黄土区小流域地形特征分析及植被对径流的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [29] 李明峰, 董云社, 耿元波, 齐玉春. 草原土壤的碳氮分布与 CO₂ 排放通量的相关性分析. *环境科学*, 2004, 25(2):7-11.

(上接第 317 页)

参考文献:

- [1] 杨家军, 吐尔逊·哈斯木, 阿迪力·吐尔干, 阿不力提甫·吾甫尔, 等. 近 50 年来塔里木河流域水域环境现状及其驱动力分析[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1):76-81.
- [2] 吐尔逊·哈斯木, 瓦哈瓦哈甫·哈力克, 艾力克木·哈德尔, 等. 塔里木河下游生态输水前后生态与环境的动态变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(4):42-47.
- [3] 阿依先木·司马义, 吐尔逊·哈斯木, 祖木拉提·伊布拉音, 马木提江·卡日, 曼尼萨汗·吐尔隼. 人类活动对土地沙漠化的影响研究: 以塔里木河下游为例[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(1):56-60.
- [4] 郭英杰, 许英勤, 马彦华. 新疆塔里木河下游应急输水的生态效益[J]. *干旱区地理*, 2002, 25(3):237-240.
- [5] 李卫红, 陈亚鹏, 张宏峰, 等. 塔里木河下游断流河道应急输水与地表植被响应[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(3):301-305.
- [6] 高前兆, 屈建军, 王润, 等. 塔里木河下游绿色走廊生态输水对沙漠化逆转的影响[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(1):52-58.
- [7] 陈亚宁, 张小雷, 祝向民, 等. 新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析[J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(5):475-482.
- [8] 徐海量, 叶茂, 李吉玫. 塔里木河下游输水后地下水动态变化及天然植被的生态响应[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(4):460-470.
- [9] 孙卫, 侯平, 李霞. 胡杨枝直径生长对塔里木河下游应急输水的响应[J]. *生态学报*, 2006, 26(9):2913-2917.
- [10] 哈力克·玉米提, 柴政, 罗淑政, 等. 新疆塔里木河下游胡杨树高生长量及其空间分布研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(5):187-191.
- [11] 徐海量, 宋郁东, 王强. 胡杨生理指标对塔里木河下游生态输水的响应[J]. *环境科学研究*, 2003, 16(4):24-27.
- [12] 张余庆, 陈昌春, 姚鑫, 等. 江西省信江流域极端降水时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(4):189-194.
- [13] 张余庆, 项瑛, 陈昌春, 等. 赣江流域旱涝时空变化特征研究[J]. *气象科学*, 2015, 35(3):346-352.
- [14] 王增如, 徐海量, 尹林克, 等. 塔里木河下游荒漠化过程土壤种子库特征[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(5):885-890.
- [15] 傅彦仪, 徐海量, 赵新风, 等. 漫溢干扰对塔里木河河岸退化植被的影响[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(1):60-66.
- [16] 龚君君, 叶茂, 禹朴家, 等. 生态输水对塔里木河下游胡杨主干径向生长量影响研究: 以依干不及麻断面为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(2):162-166.
- [17] 李霞, 侯平, 杨鹏年. 塔里木河下游胡杨对水分条件变化的响应[J]. *干旱区研究*, 2006, 23(1):26-31.
- [18] 安红燕, 徐海量, 叶茂, 等. 塔里木河下游生态输水后胡杨径向生长量的时空变化[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1):29-34.